ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

Том 179 1969

О СТОПРОЦЕНТНОЙ ЗАЩИТЕ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

Р.А. ВАЙНШТЕЙН, А.В. ШМОЙЛОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических станций и электрических сетей и систем)

Из всех повреждений синхронных генераторов большинство приходится на статоры, причем основная масса повреждений вызывается заводскими дефектами изготовления [1]. Приводимые там же статистические данные показывают, что количество повреждений генераторов со временем не убывает. Так, например, общее число повреждений генераторов в 1964 г. возросло по сравнению с 1963 г. Это объясняется освоением новых уникальных генераторов для сверхмощных тепловых и гидравлических электростанций, строящихся в СССР. Большинство электрических повреждений, вызванных теми или иными причинами, относится к замыканиям обмотки статора на землю. Часто однофазное замыкание успевает перейти в многофазное короткое замыкание, прежде чем возникшая авария оказывается ликвидированной [2].

Генераторы большой мощности (более 50 МВт) работают в блоке с трансформатором. При этом, за исключением сравнительно редких случаев (несколько гидрогенераторов работают параллельно на одну обмотку трансформатора), генераторы не имеют между собой электрической связи. Это обстоятельство в большинстве случаев облегчает выполнение защиты от замыканий на землю обмотки статора, так как не требуется определять поврежденный генератор, но не снимает проблему обеспечения других современных требований, предъявляемых к земляной защите синхронных генераторов. Эти требования сводятся к следующему: 1) отсутствию мертвой зоны, 2) отсутствию необходимости введения выдержки времени для обеспечения селективности.

Необходимость выполнения этих требований объясняется следующим. Наличие выдержки времени у защиты увеличивает вероятность возникновения двойного замыкания на землю при нарушении изоляции другой фазы.

При наличии мертвой зоны у данной защиты возможны весьма опасные повреждения – замыкания фазы на нейтраль генератора. Установившийся ток при данном виде повреждения, например для гидрогенераторов, превышает установившийся ток трехфазного замыкания в два с лишним раза [3].

Существующая защита от замыканий на землю синхронных генераторов, работающих в блоке с трансформаторами, по принципу действия имеет мертвую зону вблизи нейтрали генератора (15 %). Необходимость обеспечения селективности при замыканиях на землю на высокой стороне трансформатора вынуждает вводить выдержку времени в действие защиты.

Ликвидация выдержки времени может быть произведена только ценой загрубления защиты и, следовательно, увеличения мертвой зоны [6].

Ни один из известных методов, использующий естественные электрические величины в установившемся или переходном режиме, не позволяет осуществить защиту без мертвой зоны, так как потенциал нейтрали относительно земли близок к 0.

В связи с этим представляется целесообразной разработка защиты, реагирующей на искусственно вводимые электрические величины, смещающие электрическую нейтраль сети. Подобная защита применительно к распределительной кабельной сети с компенсированной нейтралью разработана на кафедре электрических станций Томского политехнического университета [4]. Защита осуществляется путем включения источника с частотй 25 Гц последовательно в цепь дугогасящей катушки.

Предварительные исследования показывают, что эта защита при соответствующем выполнении реагирующего органа успешно может быть применена для мощных блоков генератор-трансфоматор с заземлением нейтрали генератора через дугогасящую катушку. Наиболее просто можно выполнить защиту для блоков с одним генератором или для укрупненных блоков с расщепленной первичной обмоткой блочного трансформатора. Защита может быть выполнена также для укрупненных блоков с одной обмоткой низшего напряжения трансформатора. Следует отметить, что величина частоты вспомогательного источника и способ его включения в цепь нейтрали также имеют принципиальное значение. При частотах выше промышленной кратность изменения вспомогательного тока как по модулю, так и по фазе всегда меньше. Выбор для источника смещения нейтрали генераторов частоты 25 Гц определился возможностью использования бесконтактного статического устройства – электромагнитного параметрического делителя часто-

ты, а также годовым опытом эксплуатации такого источника в промышленных условиях на Барнаульской ТЭЦ-2. Ниже показано, что характер изменения тока с частотой 25 Гц при замыкании на землю одной фазы всегда благоприятен. При этом нужные характеристики реагирующего органа могут быть получены с помощью сравнительно простых технических средств.

На рис. 1, *а* показана принципиальная схема включения защиты, где обозначено: ДГК – дугогасящая катушка, ТТ – трансформатор тока, ИКТ – источник контрольного тока 25 Гц, РО – реагирующий орган. На рис. 1, *б* вычерчена схема замещения участка цепи генератор – трансформатор. На ней обозначено:

$U_К$ – напряжение источника контрольного тока (ИКТ);

$Z_{КТ}$ – внутренне сопротивление ИКТ;

$Z_Д$ – полное сопротивление дугогасящей катушки:

$C_Г$ – емкость фазы генератора относительно земли;

$C_Т$ – емкость фазы обмотки низшего напряжения трансформатора относительно земли;

$C_{Т(МО)}$ – продольная емкость фазы трансформатора между обмотками высшего и низшего напряжений.

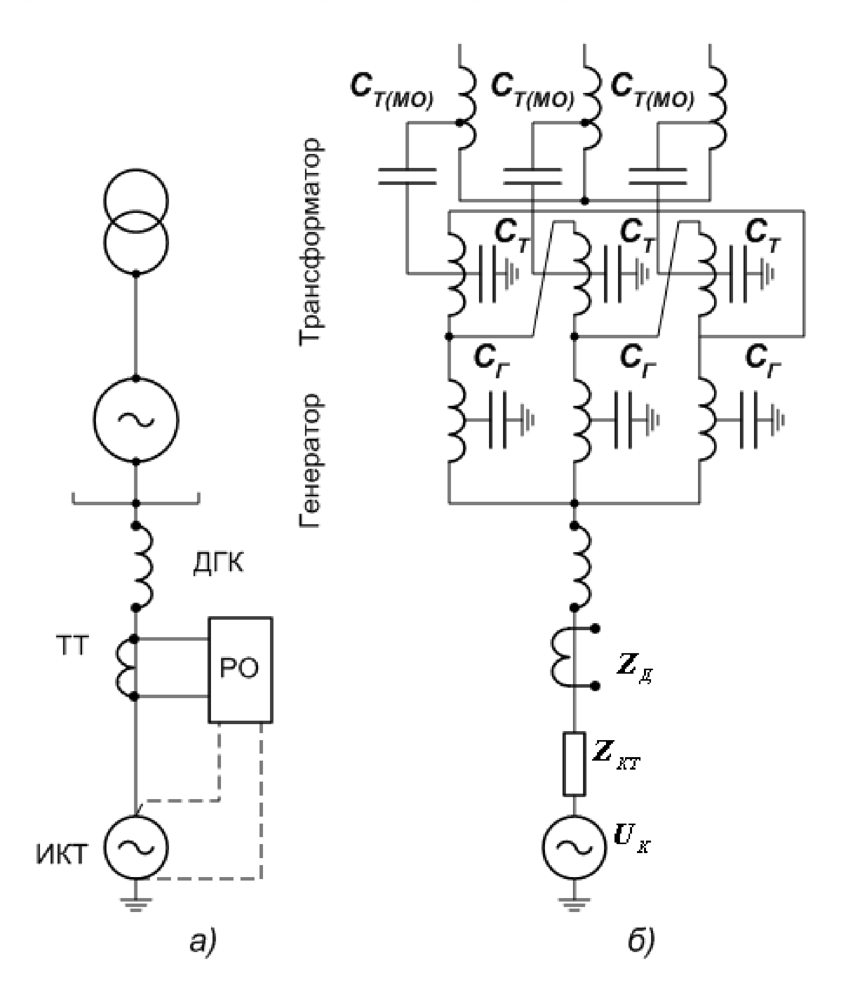


Рис. 1.

В дальнейшем при определении установившегося контрольного тока делаем следующие допущения:

1) пренебрегаем продольным сопротивлением нулевой последовательности;
2) пренебрегаем всеми активными потерями;
3) ИКТ считаем источником напряжения потому, что $Z_{КТ}$ пренебрежимо мало по сравнению с сопротивлением дугогасящей катушки.

С учетом этих допущений, которые, вообще говоря, являются общепринятыми при определении токов нулевой последовательности частотой 50 Гц в сетях с изолированной или компенсированной нейтралью (при частоте контрольного тока 25 Гц эти допущения можно принять и подавно), получим расчетную схему замещения, изображенную на рис. 2.

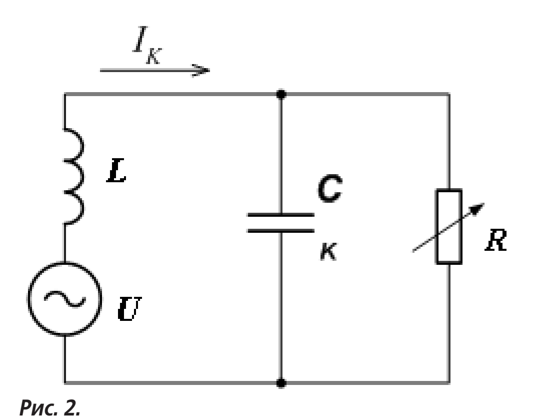


Рис. 2.

На схеме замещения обозначено:

L – индуктивность дугогасящей катушки;

C – суммарная емкость сети генераторного напряжения;

R – переходное сопротивление в месте замыкания на землю;

I^K – ток 25 Гц через трансформатор тока защиты;

U – напряжение ИКТ.

При замыкании через переходное сопротивление контрольный ток равен

$$\dot{I}_K = \frac{\dot{U}(1 + jR\omega C)}{(R - \omega^2 RLC) + j\omega L}, \qquad (1)$$

где $\omega = \frac{1}{2}\omega_p$ – частота контрольного тока; $\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – резонансная частота контура, образованного дугогасящей катушкой и суммарной емкостью генераторной сети.

Так как настройку дугогасящей катушки стараются установить по возможности ближе к резонансной, будем полагать, что $\omega_p = \omega_{сети}$.

Введя обозначение $\omega_\pi L = X_L$ и положив $\dot{U}=1$, после преобразования выражения (1) получим

$$\dot{I}_{K*} = \frac{16R}{9R^2 + 4X_L^2} + j\frac{2(3R^2 - 4X_L^2)}{9R^2 X_L + 4X_L^3}. \qquad (2)$$

При изменении переходного сопротивления R в пределах [∞ ÷0] конец вектора I_K опишет полуокружность с центром, лежащим на перпендикуляре к направлению вектора $\dot{U}=1$ (рис. 3). Центр окружности отстоит от начала вектора $\dot{U}$ на расстоянии $\frac{2}{3X_L}$ в сторону отставания.

Из диаграммы видно, что отношение величины тока $\dot{I}_K$ при замыкании без переходного сопротивления к току нормального режима равно 3, фаза тока меняется при этом на 180°. На рис. 4 приведены кривые: 1) зависимости модуля контрольного тока от величины переходного сопротивления $I_K=f_1(R)$, 2) зависимости фазы контрольного тока от величины переходного сопротивления $\varphi=f_2(R)$. Характер изменения кривых $I_K=f_1(R)$ и $\varphi=f_2(R)$ позволяет заключить следующее:

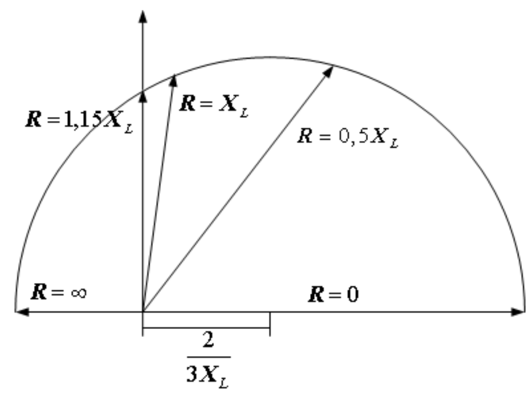


Рис. 3.

1. Реагирующий орган защиты может быть выполнен на токовом принципе. Чувствительность и селективность такого органа будут удовлетворительными при условии, если он будет обладать повышенной чувствительностью к току с частотой 25 Гц. Это облегчает отстройку от высших гармоник и промышленной частоты при замыкании на стороне высшего напряжения блока. Недостатком такого органа является малая чувствительность при замыкании через переходное сопротивление.

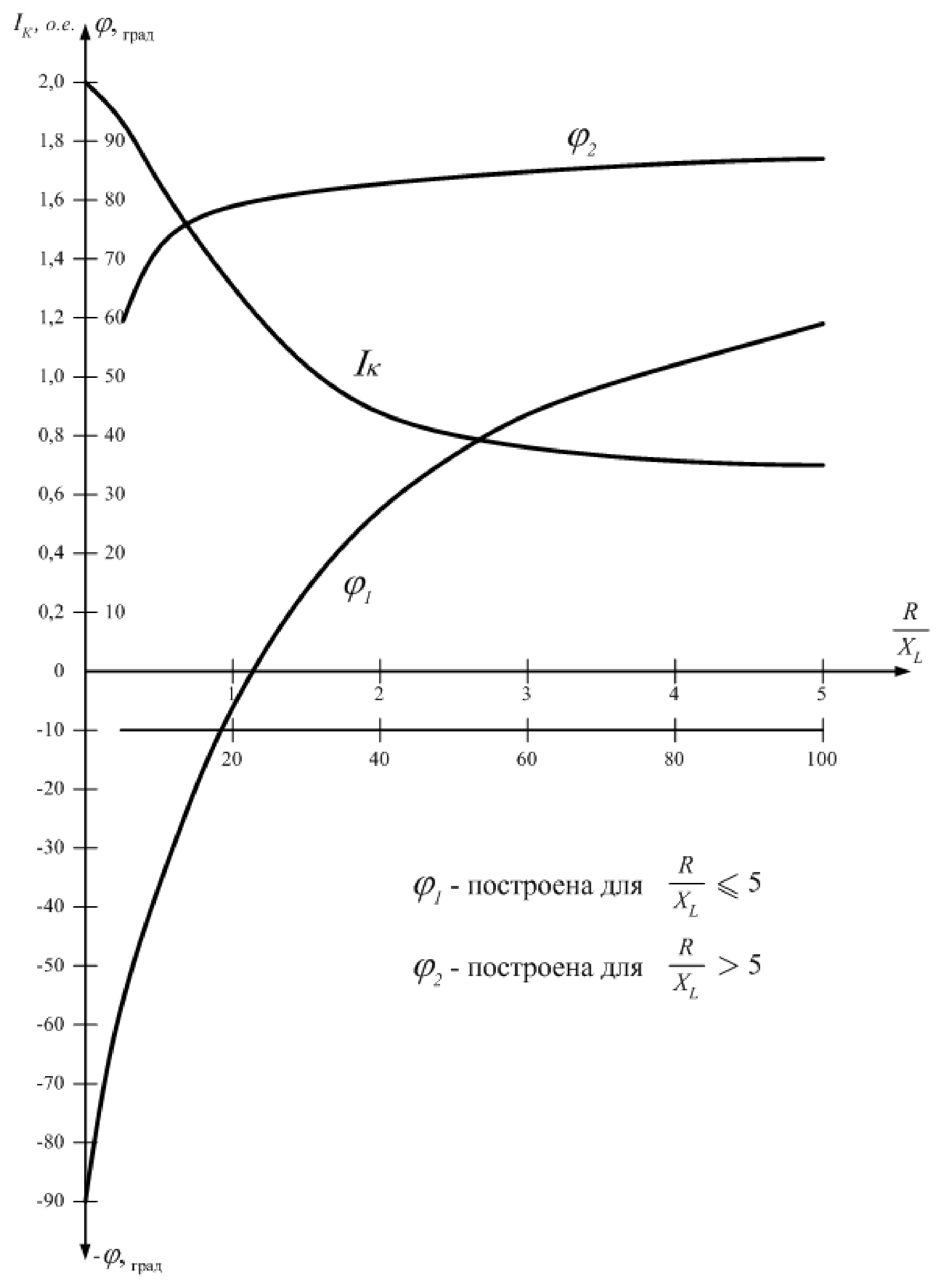


Рис. 4.

2. Реагирующий орган может быть выполнен фазочувствительным. Изменение фазы на 180° при металлическом замыкании позволяет осуществить торможение в нормальном режиме. При этом реагирующий орган будет очень хорошо отстроен от высших гармоник и от замыканий на стороне высшего напряжения блока.

Обращает на себя внимание очень резкое изменение фазы контрольного тока при замыкании через большое переходное сопротивление. Это обстоятельство позволяет выполнить защиту, действующую при значительных переходных сопротивлениях. При этом чувствительность ее может регулироваться изменением угла наклона линии изменения знака выходной величины реагирующего органа. Защита может быть оборудована также более чувствительной ступенью, действующей на сигнал в области торможения основ-

ного органа. Так как кроме тока с частотой 25 Гц через трансформатор тока защиты при замыкании на землю протекает ток промышленной частоты, необходимо придать реагирующему органу частотно-избирательные свойства или компенсировать ток промышленной частоты во вторичных цепях напряжением нулевой последовательности, которое всегда пропорционально этому току. Реализацию необходимых свойств реагирующего органа предполагается выполнить на основе кольцевого модулятора на полупроводниковых диодах или на основе фазочувствительного усилителя на транзисторах. Последний, конечно, более предпочтителен, так как, обладая такой же фазовой характеристикой, что и кольцевая фазочувствительная схема, имеет значительно большую выходную мощность. Опорное напряжение на фазочувствительные устройства будет подаваться от источника контрольного тока. Нужно отметить, что эти схемы, по крайней мере частично, по принципу действия будут одновременно решать вопрос отстройки от токов промышленной частоты. Это объясняется тем, что при кратности частот, опорного напряжения и сигнала, равной четному числу, среднее значение напряжения на выходе обеих фазочувствительных схем равно 0.

При наличии на станции нескольких блоков (если генераторы не имеют электрической связи) защита может быть выполнена для каждого генератора отдельно (рис. 1).

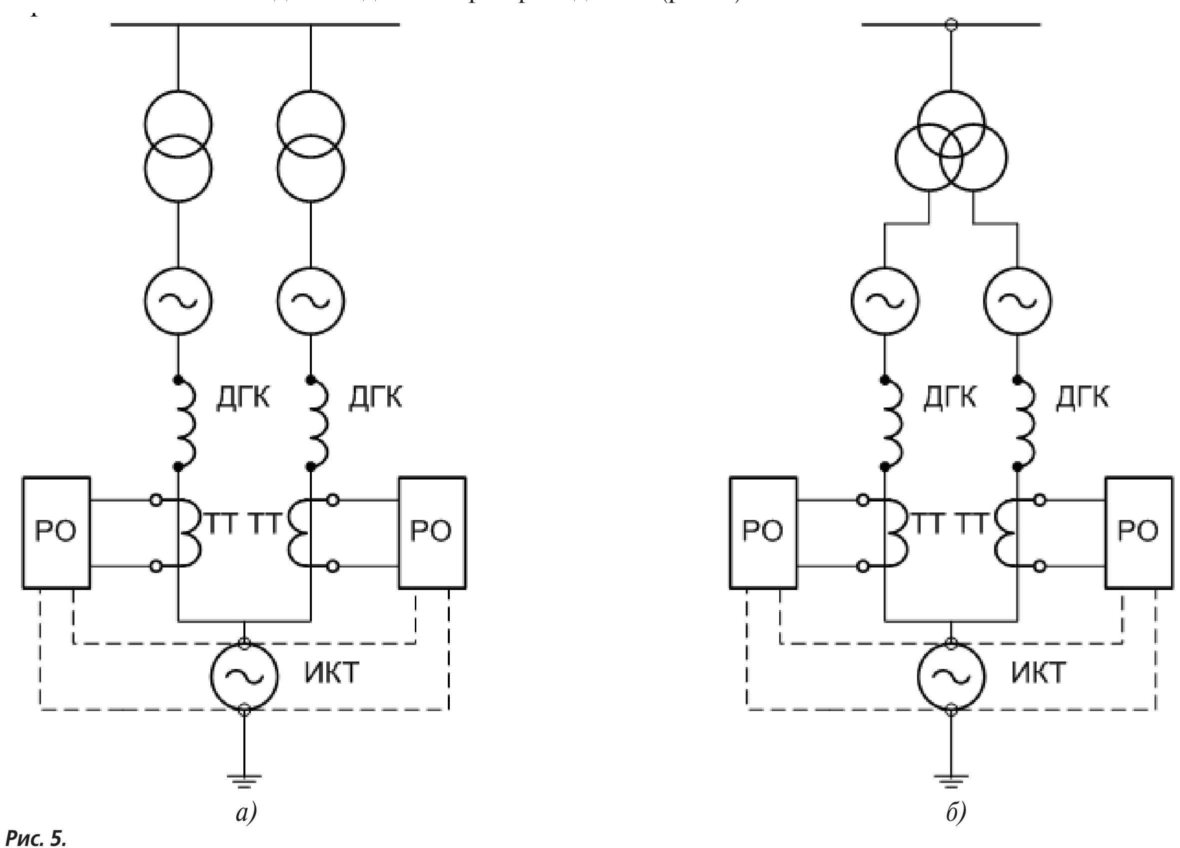
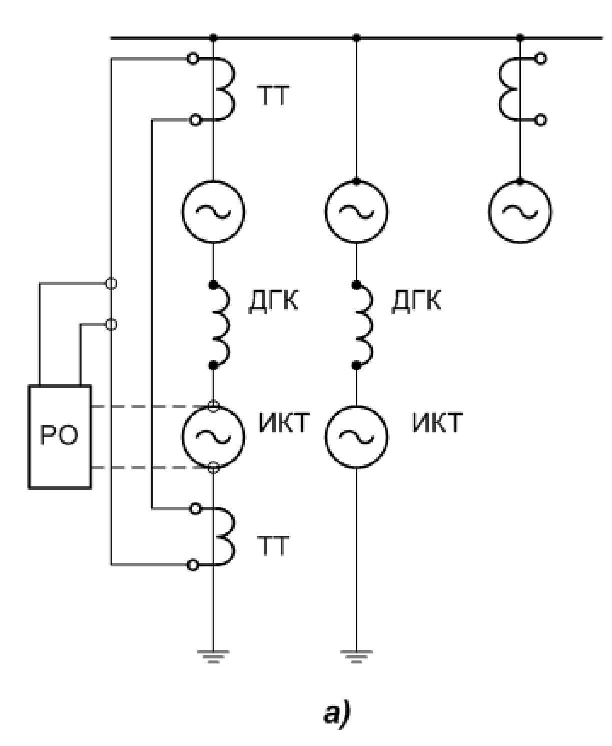


Рис. 5.

Для выполнения защиты по этому варианту необходимо в нейтраль каждого генератора установить ИКТ.

Однако возможен и другой вариант, показанный на рис. 5, *а, б*. В этом варианте для защиты группы генераторов используется один ИКТ. Мощность ИКТ в таком случае может потребоваться больше мощности индивидуальных ИКТ для того, чтобы обеспечить в нормальном режиме необходимый ток торможения в реагирующем органе. Чувствительность защиты к замыканиям на землю не уменьшается. При использовании рассматриваемого варианта защиты целесообразна установка резервного ИКТ, что повысит надежность защиты. При выполнении защиты по этому варианту потребуется осуществить соединение заземляемых выводов дугогасящих катушек генераторов.

На рис. 6, *а, б* приведены варианты выполнения защиты от замыканий на землю генераторов, работающих на сборные шины: а) с несколькими ИКТ по количеству генераторов, имеющих компенсированные нейтрали; б) с одним ИКТ. Для осуществления селективной защиты в этих вариантах необходимо использовать дифференциальную схему. В нормальном режиме работы генератора по реагирующему органу будет протекать емкостной ток торможения, а при замыкании на землю – ток противоположной фазы, определяемой индуктивностью дугогасящих катушек.



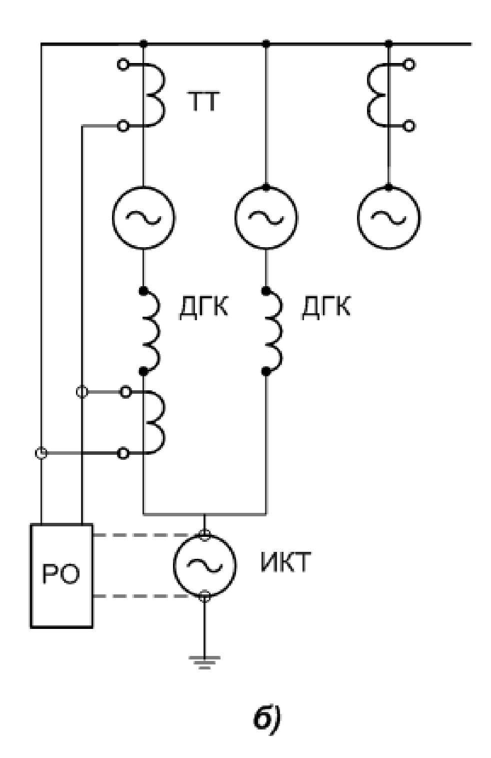


Рис. 6.

В настоящее время при выполнении защиты на естественном токе нулевой последовательности на выводах генераторов устанавливают шинный трансформатор тока нулевой последовательности [6]. Этот трансформатор может быть использован и в данном случае без всякой переделки для включения в дифференциальную схему. Согласованию с ним будет подлежать трансформатор тока, устанавливаемый в цепи нейтрали. Нужно отметить, что благодаря возможности частотной отстройки от токов небаланса фильтров тока нулевой последовательности требования к трансформатору, устанавливаемому на выводах генератора, могут быть снижены, а также появляется принципиальная возможность использовать трехтрансформаторный фильтр нулевой последовательности.

Выводы

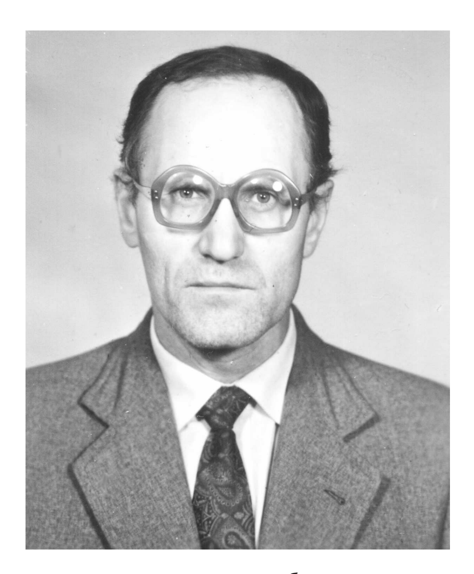
1. Крупные повреждения генераторов возникают в связи с повреждением или ослаблением изоляции по отношению к земле.
2. Существующие контроль изоляции и защита от замыканий на землю, реагирующие на естественные электрические величины, по принципу действия имеют мертвую зону, работают с выдержкой времени, слабо чувствительны к переходным сопротивления в месте повреждения.
3. Рассматриваемая защита, реагирующая на изменение фазы контрольного тока 25 Гц, вводимого в цепи генератора с помощью параметрического делителя частоты, не имеет мертвой зоны, более чувствительна к переходным сопротивления, может работать без выдержки времени, сигнализировать ослабление изоляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ аварий и случаев брака в работе на электростанциях и сетях энергосистем электрической и гидротехнической части. "Энергия", 1965.
2. А.М. Федосеев. Основы релейной защиты. ГЭИ, 1961.
3. М.П. Костенко, Л.М. Пиотровский. Электрические машины, часть II, "Энергия", 1965.
4. Р.А. Вайнштейн. Применение низкочастотных параметрических систем для защиты от замыканий на землю компенсированных сетей. Диссертация, Томск, 1965.
5. К.Т. Митюшкин. Магнитный делитель частоты. "Электричество", № 8, 1957.
6. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 5. Защита блоков генератор — трансформатор и генератор — автотрансформатор, "Энергия", 1963.



Роберт Александрович Вайнштейн в 1960 году по предложению И.Д. Кутявина начал работу по решению актуальной в электроэнергетике проблемы — защиты от однофазных замыканий в электроустановках с малыми токами замыкания на землю. Р.А. Вайнштейном были предложены эффективные методы выполнения защиты и конкретные пути технической реализации этих методов. Так, в 1964 г. в т. 130 "Известия ТПУ" им была опубликована статья "Защита от устойчивого замыкания на землю ...", в которой был изложен основополагающий принцип метода выполнения защиты. Аппаратура, созданная затем на базе исследований, выполненных в ТПУ, в течение нескольких десятков лет успешно эксплуатируется на всех электростанциях Кузбасса, на крупнейшей в мире Красноярской ГЭС и многих других предприятиях. Эффективность предложенных методов и устройств подтверждается тем, что и в настоящее время, спустя почти сорок лет, разработки ТПУ по этому направлению включаются в проекты новых энергетических объектов, используются в аппаратуре, выпускаемой одной из ведущих по релейной защите фирм России (Экра). Деятельность ТПУ в данной области широко известна специалистам-электроэнергетикам. По данной тематике успешно защищено 14 кандидатских диссертаций, опубликовано около 100 научных работ.



Анатолий Васильевич Шмойлов принимал активное участие в работах по защите от замыканий на землю в период с 1963 по 1970 г. Им были проведены глубокие исследования электромагнитного параметрического делителя частоты, на базе которого разработан один из важнейших элементов, используемых в защите — источник контрольного тока с частотой 25 Гц.

В настоящем выпуске представлена одна из ранних статей Р.А. Вайнштейна по комплексу работ, связанных с защитами от замыканий на землю.